

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК 621.311.001.57

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
_____ Кружаев В.В.
«__» _____ 2013

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.2.1.1.1 Плана реализации мероприятий Программы развития
УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:

**Исследование способов настройки реальных регуляторов возбуждения с
применением современных способов синтеза систем регулирования**

(Заключительный)

Зав.кафедрой

(подпись, дата)

Научный руководитель

(подпись, дата)

Исполнитель

(подпись, дата)

Екатеринбург 2013

Реферат

1. ФИО автора (ов): Чусовитин Павел Валерьевич, Chusovitin Pavel.

2. Аннотация: для устойчивого управления энергосистемой необходима адекватная настройка регуляторов скорости и возбуждения синхронных генераторов. В ходе настройки невозможно учесть весь спектр схемно-режимных ситуаций. Тем не менее, сложившаяся практика настройки регуляторов позволяет получить параметры, обеспечивающую устойчивость работы оборудования в широком диапазоне режимов.

Современные методы синтеза систем регулирования позволяют создавать более эффективные регуляторы. Однако существует проблема настройки существующих регуляторов в соответствии с параметрами синтезированных искусственных регуляторов. Синтезированные теоретические регуляторы обладают большой размерностью и их невозможно непосредственно использовать для настройки реальных регуляторов. Кроме того, перспективной областью исследований в части настройки регуляторов является настройка в реальном времени на основе идентифицированной эквивалентной модели энергосистемы. Для настройки с помощью эквивалентной модели и для настройки на основе синтезированных теоретических регуляторов можно использовать единую методологию.

Abstract: adequate regulator`s tuning is vital for stable power system operation. It is challenge to tune regulators analyzing whole number of power system conditions. Nevertheless, current techniques allow to tune regulator for wide area (but not all) of power systems conditions.

There is a number of techniques for synthesizing optimal regulators. The problem is that order of the synthesized regulator is equal to order of power system. Consequently, such regulator can hardly be applied in real power system. Main aim of the project is to design the algorithm tuning real power system regulators in optimal way. In addition, there were methods developed for identification of the equivalent dynamic power system model. These methods can be applied for on-line tuning of power system regulators.

3. Ключевые слова: Статическая устойчивость, настройка регуляторов, матрица состояния.

Keywords: small-signal stability, regulators tuning, state matrix.

4. Тема отчета:

Способы настройки реальных регуляторов возбуждения с применением современных способов синтеза систем регулирования.

Implementation of regulators synthesizing techniques for tuning real power systems regulators.

Оглавление

Обозначения и сокращения	4
Введение	5
1. Настройка регулятора на основе синтеза	6
1.1. Получение модели энергосистемы	6
1.2 Модификация модели	7
1.3 Синтез "теоретического" регулятора	8
1.4 Определение настройки реального регулятора	8
2. Настройка регулятора с помощью оптимизационной процедуры	10
2.1. Метод настройки	10
2.2 Результаты применения методики	10
2.2.1. Упрощенная модель генератора	11
Рис. 6. Структурная схема блока АРВ СД	12
2.2.2. Модель Парка-Горева.....	13
Заключение	16
Список использованных источников	17

Обозначения и сокращения

АРВ СД - автоматический регулятор возбуждения сильного действия;

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика;

ФЧХ - фазо-частотная характеристика;

ЦВД - цилиндр высокого давления;

ЦСД - цилиндр среднего давления.

Введение

Для устойчивого управления энергосистемой необходима адекватная настройка регуляторов скорости и возбуждения синхронных генераторов. В ходе настройки невозможно охватить весь спектр схемно-режимных ситуаций. Тем не менее, сложившаяся практика настройки регуляторов позволяет получить параметры, обеспечивающую устойчивость работы оборудования в широком диапазоне режимов.

Тем не менее современные методы синтеза систем регулирования позволяют создавать более эффективные регуляторы. Однако существует проблема настройки существующих регуляторов в соответствии с параметрами синтезированных искусственных регуляторов. Синтезированные теоретические регуляторы обладают большой размерностью и их невозможно непосредственно использовать для настройки реальных регуляторов.

Кроме того, перспективной областью исследований в части настройки регуляторов является настройка в реальном времени на основе идентифицированной эквивалентной модели энергосистемы. Для настройки с помощью эквивалентной модели и для настройки на основе синтезированных теоретических регуляторов можно использовать единую методологию.

1. Настройка регулятора на основе синтеза

Настройка регулятора с целью определения коэффициентов его передаточной функции (рис. 1).

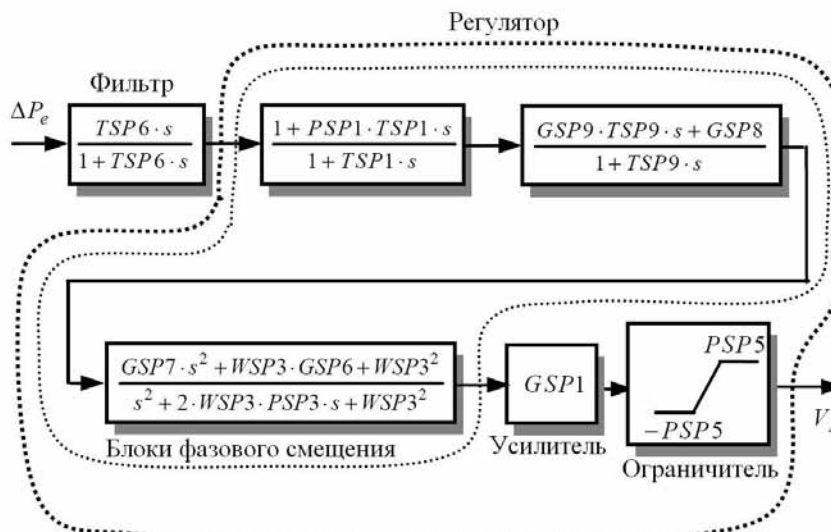


Рисунок 1 – Структурная схема стабилизатора энергосистемы

Эта задача решается в несколько шагов:

1. Получение модели энергосистемы и генератора. Здесь предлагается два подхода:
 - Линеаризация динамической модели энергосистемы;
 - Применение идентифицированной модели.
2. Полученная модель дополняется входными сигналами шума, весовыми коэффициентами для управления процессом настройки и дополнительным блоком Δ (рис. 3), моделирующим неопределенность состояния системы.
3. С помощью стандартной функции синтеза μ -регулятора, входящей в Robust Control Toolbox программного комплекса Matlab получается абстрактный регулятор, обеспечивающий устойчивое регулирование во всем диапазоне режимов, определяемом матрицей Δ .
4. АЧХ и ФЧХ реального регулятора методом наименьших квадратов подгоняются к АЧХ и ФЧХ синтезированного регулятора.

1.1. Получение модели энергосистемы

Линеаризация динамической модели энергосистемы и генератора решается разложением в ряд Тейлора каждого из уравнений (алгебраических или дифференциальных), описывающих состояние энергосистемы. Структура линеаризованной модели представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структура линейризованной модели синхронного генератора

В случае применения идентифицированной модели, линейризованная модель непосредственно берется, как результат алгоритма идентификации.

1.2 Модификация модели

Модель на рисунке 2 дополняется входными сигналами шума, весовыми коэффициентами для управления процессом настройки и дополнительным блоком Δ (рис. 3), моделирующим неопределенность состояния системы.

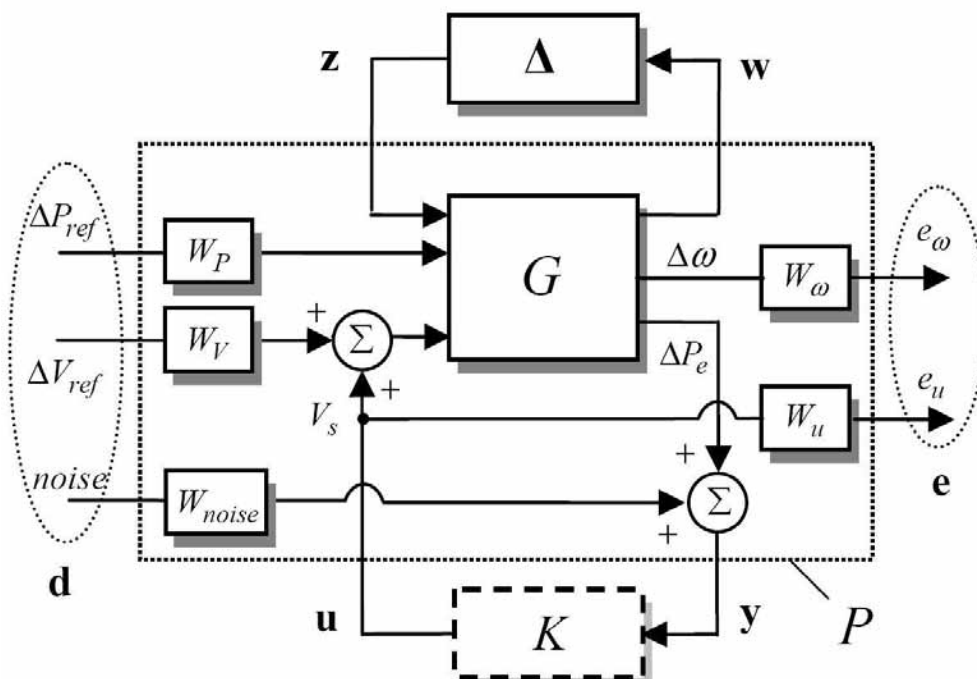


Рисунок 3 – Структура модели для настройки стабилизатора

Матрица G на рисунке 3 полностью содержит в себе линейризованную модель генератора, внешней системы, турбины, регулятора скорости и системы возбуждения. Матрица Δ содержит в себе коэффициенты, пропорционально которым изменяются коэффициенты матрицы G при изменении состояния w . Вектор w как раз и содержит

информацию об отклонении режима генератора от номинального, для которого была произведена линеаризация. В простейшем случае вектор w включает только одну переменную – отклонение внутреннего угла генератора от номинала и матрица Δ показывает как изменятся коэффициенты матрицы G в зависимости от этого отклонения. Значения коэффициентов матрицы Δ получаются из серии линеаризаций модели в соответствии с рисунком 2 для различных режимов генератора.

1.3 Синтез "теоретического" регулятора

С помощью стандартной функции синтеза μ -регулятора, входящей в Robust Control Toolbox программного комплекса Matlab получается абстрактный регулятор, обеспечивающий устойчивое регулирование во всем диапазоне режимов, определяемом матрицей Δ .

Синтезированный регулятор невозможно применить в реальной энергосистеме т.к. размерность его динамической модели превышает размерность объекта управления. Эта проблема решается на следующем шаге.

1.4 Определение настройки реального регулятора

Синтезированный регулятор имеет свои АЧХ и ФЧХ, как и стабилизатор показанный на рисунке 1. Идея заключается в том, чтобы методом наименьших квадратов привести АЧХ и ФЧХ стабилизатора на рисунке 1 к характеристикам синтезированного «математического» регулятора.

Далее приведен результат настройки реального регулятора по вышеописанной методике.

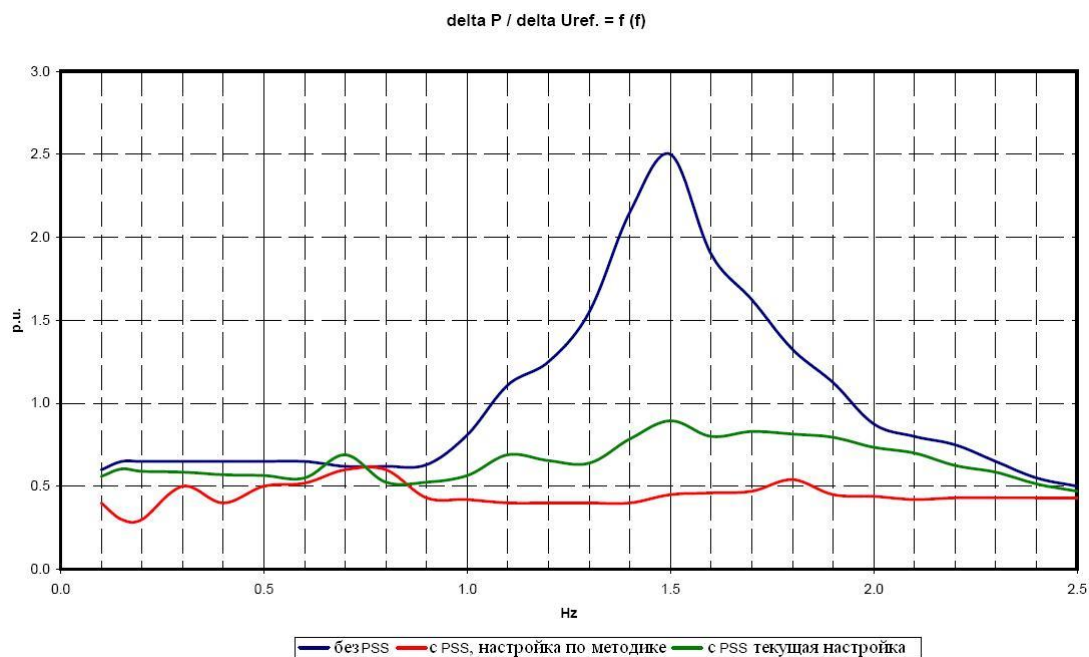


Рисунок 4 – Частотные характеристики генератора с различными вариантами настройки стабилизатора энергосистемы

Как видно из рисунка 4, для генератора без стабилизатора на частотной характеристике имеется пик на частоте 1,5 Гц, соответствующей собственным электромеханическим колебаниям. Для генератора со стабилизатором и стандартными настройками максимум частотной характеристики также приходится на 1,5 Гц. График показывает, что настройка регулятора по описанной методике снижает амплитуду характеристики в широком диапазоне частот, соответствующих низкочастотным колебаниям, что говорит об эффективности метода.

2. Настройка регулятора с помощью оптимизационной процедуры

Настройка регуляторов возбуждения с большим числом параметров осуществляется как правило эмпирически [1], поэтому разработка подходов к настройке регуляторов возбуждения является практически значимой задачей.

В данной статье предложена методика настройки регулятора возбуждения сильного действия по линеаризованной модели энергосистемы с применением методов оптимизации для поиска параметров регулятора. Схожий подход, но на основе идентифицированной модели представлен в [2].

2.1. Метод настройки

Из теории устойчивости известно, что устойчивость динамической системы можно оценить по положению собственных чисел матрицы частных производных системы дифференциальных уравнений. Действительные части комплексно-сопряженных корней определяют декремент затухания, а мнимые части - частоту колебаний. Из этого можно заключить, что чем больше по модулю действительные части корней, тем быстрее затухают колебания в системе. Соответственно, настройки регулятора возбуждения должны обеспечивать наибольшее смещение собственных чисел матрицы состояния в левую часть комплексной плоскости. Вариант такого подхода к настройке регуляторов возбуждения изложен в [2].

В данной работе этот подход был применен для настройки АРВ СД. Как было отмечено, в программном комплексе Matlab была создана схема электрической сети, для которой определялась линеаризованная модель. Параметры линеаризованной модели включают в себя элементы, определяемые настройками регулятора возбуждения.

С помощью алгоритма непосредственного поиска [8] определялись такие параметры, при которых значение целевой функции:

$$\min J = \max_i \frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + w_i^2}}, \quad (1)$$

где J – значение целевой функции; a_i, w_i – действительная и мнимая часть i -ого собственного числа; принимало наименьшее значение. При определении значения целевой функции производился отбор собственных чисел, соответствующих низкочастотным электромеханическим колебаниям в интервале от 0,2 до 2 Гц.

2.2 Результаты применения методики

Рассматриваемая модель энергосистемы изображена на рисунке 5.

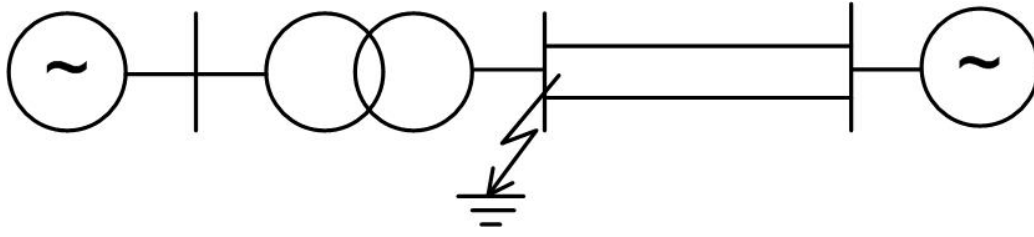


Рис. 5. Схема исследуемой сети

В исследовании рассматривались две тестовые модели: модель генератора порядка 6 и порядка 20.

2.2.1. Упрощенная модель генератора

В пакете Simulink ПО Matlab была создана пользовательская модель генератора на основе стандартных блоков. Данная модель описывается системой из 6 дифференциальных уравнений. Уравнение движение ротора и уравнение переходного процесса в обмотке возбуждения приняты в соответствии с [3, 4]. Модель генераторного агрегата включает в себя модели турбины и регулятора скорости вращения, данные модели сформированы на основе материала, изложенного в [5]. Поскольку для пользовательских блоков нет возможности использовать стандартную инициализацию параметров машин из Powergui [6], эта модель сопровождается программным кодом для инициализации начальных значений дифференцируемых переменных на основе расчета установившегося режима. Система уравнений, описывающая генератор, представлена ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_j \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{(\alpha m_{HP} + (1-\alpha)m_{LP}) - P_e}{1 + \Delta\omega} \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \\ T'_{do} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - E'_q - I_d(x_d - x'_d) \\ T_{reg} \frac{dm}{dt} = \frac{\Delta\omega}{R} + m_{ref} - m \\ T_{HP} \frac{dm_{HP}}{dt} = m - m_{HP} \\ T_{LP} \frac{dm_{LP}}{dt} = m_{HP} - m_{LP} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где m - положение регулировочного клапана турбины, в относительных единицах равно моменту и мощности турбины; m_{ref} - уставка регулятора скорости по мощности; m_{HP}, m_{LP} - мощность цилиндра высокого и низкого давления соответственно; a - доля

пара, отбираемого на промежуточный перегрев; T_{reg}, T_{HP}, T_{CH} – постоянные времени регулятора скорости, ЦВД и ЦСД соответственно.

Модель регулятора возбуждения сильного действия сформирована на основе описания, изложенного в [7]. Структурная схема устройства регулирования возбуждения сильного действия представлена на рисунке 6.

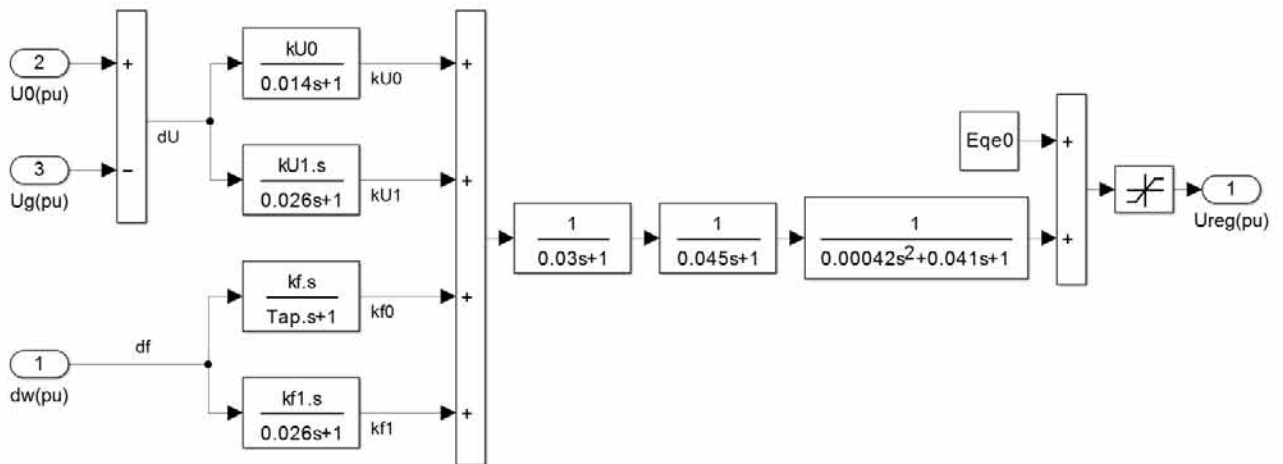


Рис. 6. Структурная схема блока АРВ СД

На рисунке 7 представлены кривые изменения частоты во времени после короткого замыкания.

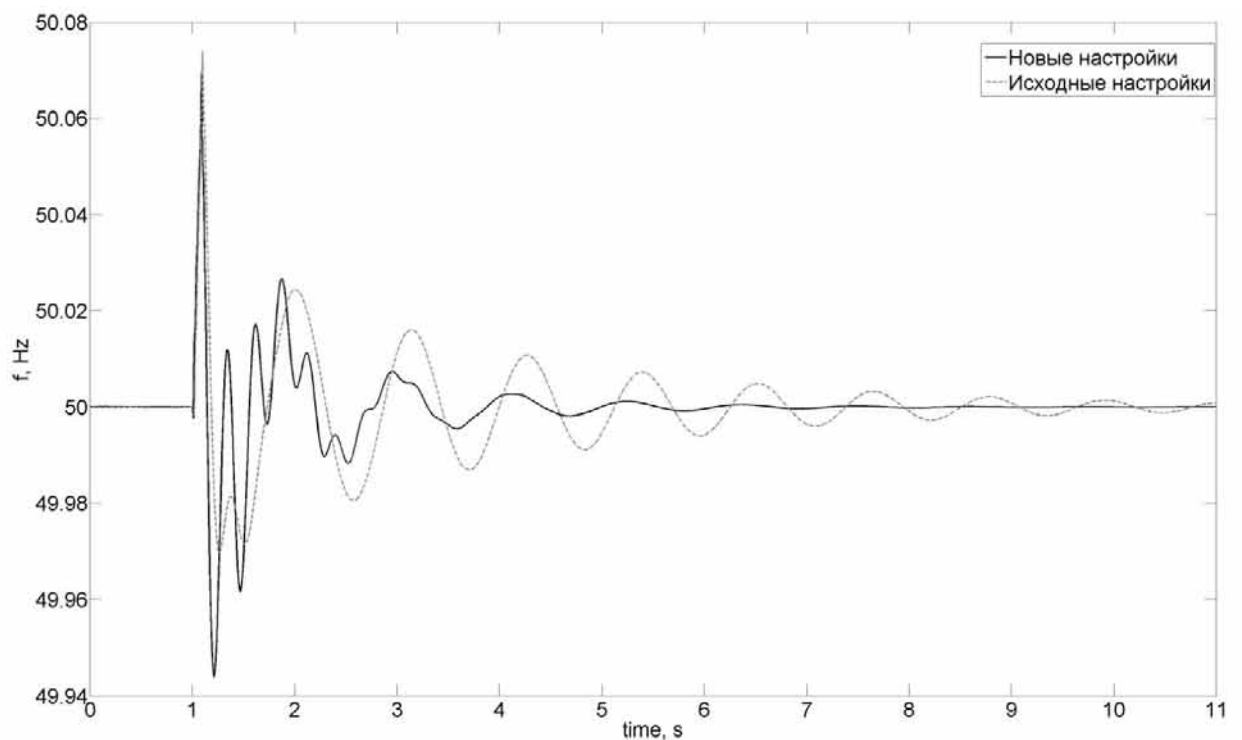


Рис. 7. Кривые частоты

В качестве первого приближения были выбраны усредненные настройки АРВ СД. Сравнение поведения системы при начальных и новых настройках, полученных в

результате работы оптимизационного алгоритма, производилось на примере реакции системы на трехфазное короткое замыкание. Место короткого замыкания указано на рисунке 5. Из графиков видно, что демпфирование низкочастотных колебаний происходит быстрее.

В данной статье показаны результаты настройки автоматического регулятора возбуждения сильного действия по линеаризованной модели энергосистемы. Как можно видеть из полученных кривых, данный метод дает хороший результат с точки зрения повышения демпфирования низкочастотных электромеханических колебаний. В дальнейшем планируется обобщить метод для настройки многомашинной системы. В качестве исходных данных для работы алгоритма предполагается замена линеаризованной модели на идентифицированную в соответствии с методами изложенными в [9,10]. Что позволит в перспективе настраивать АРВ СД для текущей режимной ситуации в реальном времени.

Результаты этого исследования опубликованы в [11].

2.2.2. Модель Парка-Горева

Дальнейшее тестирование предложенной методики заключалось в усложнении модели генератора. Как известно [3,4], модель Парка-Горева является наиболее полной моделью, описывающей состояние генератора. Эта модель была дополнена регулятором, изображенным на рисунке 6, а также моделью турбины и регулятора скорости. Результаты применения методики к описанной модели представлены ниже.

В качестве первого приближения были выбраны усредненные настройки АРВ СД. Сравнение поведения системы при начальных настройках и полученных на выходе оптимизационного алгоритма, производилось на примере реакции системы на изменение уставки регулятора возбуждения по напряжению на 5%.

В соответствии с теоретическими положениями, изложенными в [5], данное смещение полюсов системы оказало влияние на демпфирующие свойства системы. На рисунке 8 представлена комплексная плоскость, на которой показаны положения полюсов системы при начальных настройках и рассчитанных.

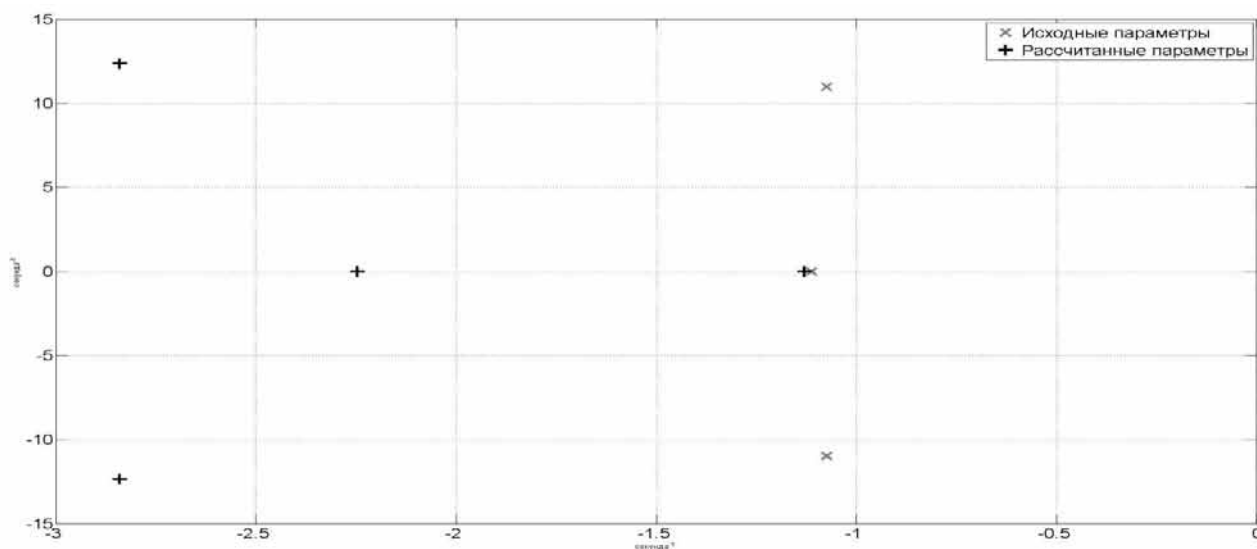


Рисунок 8. Расположение полюсов

На рисунке 9 представлены кривые изменения частоты в моделируемой энергосистеме для указанного возмущения. Как видно из предложенных кривых, демпфирующие свойства системы улучшились.

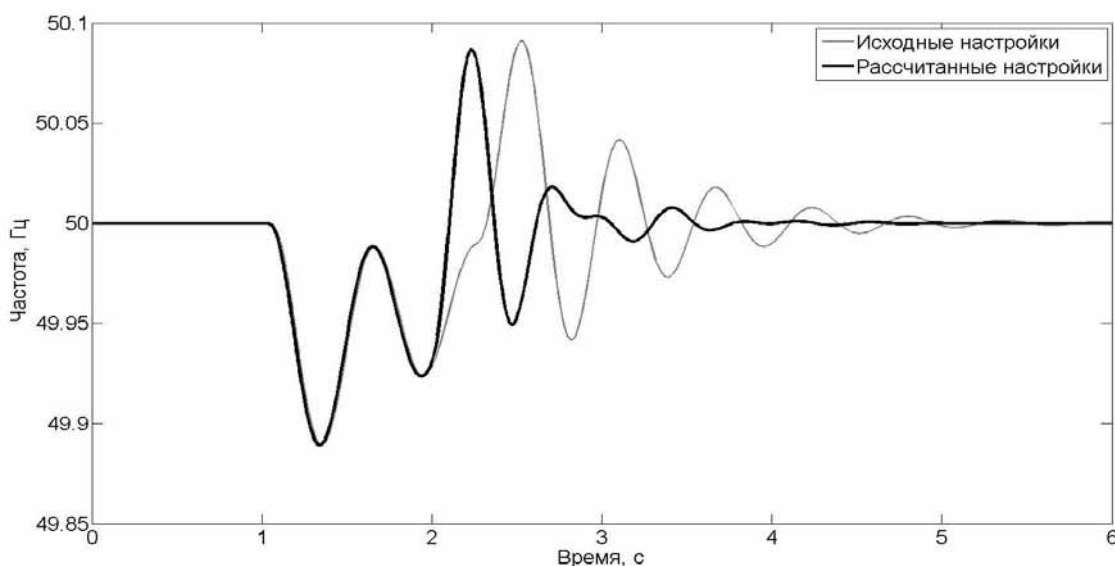


Рисунок 9. Кривые изменения частоты

В данном исследовании показаны результаты настройки автоматического регулятора возбуждения сильного действия по линеаризованной модели энергосистемы. Как видно из предложенных рисунков, в результате поиска минимума целевой функции, происходит определение таких параметров, при которых коэффициент демпфирования электромеханических колебаний принимает наибольшее значение. Это соответствует смещению полюсов линеаризованной системы вправо. Данное смещение отражается на реакции системы на возмущение. Как видно из рисунка 9, при рассчитанных параметрах повышаются демпфирующие свойства системы. В качестве исходных данных для работы алгоритма предполагается замена линеаризованной модели на идентифицированную в

соответствии с методами, изложенными в [9,10]. Что позволит в перспективе настраивать АРВ СД для текущей режимной ситуации в реальном времени, что позволит увеличить пропускную способность энергосистемы, повысить ее эффективность, сохранив или повысив ее устойчивость. Таким образом, может быть получена адаптивная система управления, которая в полной мере соответствует понятию «интеллектуальной энергосистемы».

Результаты этого исследования опубликованы в [12].

Заключение

Разработанный способ настройки регуляторов дает эффективное демпфирование электромеханических колебаний в энергосистеме. Перспективность применения этого метода возрастает при объединении его с методиками идентификации эквивалентной динамической модели энергосистемы, представленными в [9,10].

Результаты исследования апробированы на двух конференциях:

- Международная научно-практическая конференция "Электроэнергетика глазами молодежи - 2013", ЮрГТУ - НПИ, г. Новочеркасск;
- I Международный молодежный форум "Интеллектуальные энергосистемы", ТПУ, г. Томск.

На международном молодежном форуме "Интеллектуальные энергосистемы" работа была награждена дипломом I степени.

Список использованных источников

1. Армеев Д.В., Михеев А.В., Чеходанских А.В. Расчет параметров АРВ синхронного генератора методом модальной оптимизации. // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – №2(64) – 105-116
2. Masayuki Watanabe, Takanori Izumi, Takuhei Hashiguchi, Yasunori Mitani An approach for tuning of power system stabilizers based on the wide area phasor measurement // 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005.
3. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем – М., Энергия, 1979. – 456 с.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб для энерг. спец. вузов – 4-е издание – М.: Высшая школа, 1985. – 536с.
5. Kundur P. Power system stability and control, McGraw-Hill Inc, 1994.
6. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учебник для вузов – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.: ил.
7. Черных В.И. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 280 с.
8. patternsearch Matlab 2013a Help.
9. Chusovitin P.V., Pazderin A.V. Transient prediction and small-signal stability analysis using PMU-based power system identification // AsiaPES 2012, Phuket, Thailand, 2-4 April 2012.
10. Chusovitin P.V., Pazderin A.V. Implementation of power system model identification for locating in-phase generators // Proceedings of 3rd IEEE PES ISGT Europe, Berlin, 2012.
11. В.А. Тащилин, А.В. Паздерин, П.В. Чусовитин, Г.С. Шабалин, Настройка регулятора возбуждения по линеаризованной модели энергосистемы, Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV междунар. науч.-техн. конф., Т.1, г. Новочеркасск, 14-18 октября 2013 г. / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2013. – 610 с.
12. Г.С. Шабалин, А.В. Паздерин, В.А. Тащилин, П.В. Чусовитин, Использование матрицы Якоби для определения актуальной границы статической устойчивости энергосистемы, Интеллектуальные энергосистемы: труды I Международного молодежного форума. В 2т. Томск 21-25 октября 2013г. Т.1.-Материалы I Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 321 с.